



PEMODELAN MATEMATIKA: MODEL DAN SIMULASI JALUR EVAKUASI KORBAN BENCANA GEMPA BUMI DI BANGUNAN BERTINGKAT

Radiusman^{1*}, A.Fauzi², M. A.Mauldya³, A.Widodo⁴, M. Simanjuntak⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Pendidikan Guru Sekolah Dasar, FKIP, Universitas Mataram

⁵Program Studi Pendidikan Matematika, Pascasarjana, Universitas Negeri Surabaya

Diterima: 29 Mei 2020 Direvisi: 07 Juni 2020 Diterbitkan : 01 Juli 2020

ABSTRACT

The post-disaster evacuation process is something that must be done to minimize casualties. The process of evacuation should get the attention that more than the government and society. Often the process of evacuation was not done with good, so that raises some problems such as the slow evacuation, the buildup of victims in the evacuation route and increasing casualties due to slow handling. In the case of the earthquake, often found some victims do not evacuate and trapped in the rubble. Seeing the fact that, the process of evacuation of victims of the earthquake the Earth needs to be planned by well so that the evacuation can be done with good. The research is discussed about the development model of the evacuation of victims of the disaster earth on building multi-story. The stages of research begin with doing the characterization system. The next stage is the process of developing a mathematical model. After the model is developed, the method of achieving the model solution is further developed. The final stage of this research is the analysis of the model and concluding. The model is produced in the research is expected to result in a solution that is good and right for the evacuation of victims of the disaster earth on building multi-story.

Keywords: evacuation, earthquake, building storey

PENDAHULUAN

Secara ilmu kebumihan, negara Indonesia terletak pada pertemuan 3 lempengan tektonik besar yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik, sehingga rawan terhadap bencana alam yang bersifat hidrometeorologi dan geologi (Amri et al., 2016). Meningkatnya kejadian bencana beberapa tahun belakangan akibat perubahan kondisi alam maupun perbuatan manusia. Setiap 30 tahun jumlah bencana akan meningkat dari 50 sampai dengan 400 dengan berbagai skala (Kovács & Spens,

2009). Peningkatan bencana alam menimbulkan banyaknya korban. Salah satu bencana alam yang menyumbang korban terbanyak adalah gempa bumi. Gempa bumi adalah suatu peristiwa bergetar atau bergoncangnya bumi karena pergerakan/pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Gempa bumi merupakan bencana alam kedua terbesar di Indonesia setelah banjir, dan penyumbang kerugian kedua terbesar setelah kebakaran (Pribadi, Argo, Mariani, & Parlan, 2011). Dalam

*Correspondence Address

E-mail: radius_saragih88@unram.ac.id

satu dekade terakhir gempa bumi telah menimbulkan korban jiwa sebanyak 200.000 jiwa (Amri et al., 2016).

Peningkatan jumlah korban akibat bencana alam ini melahirkan banyak gagasan dalam upaya penyelamatan jiwa dari dampak yang ditimbulkan oleh bencana. Proses evakuasi merupakan salah satu kajian strategis dalam perencanaan penyelamatan korban. Proses evakuasi merupakan suatu hal yang sangat rumit (Wu, Kang, & Wang, 2018). Banyak korban bencana gempa bumi mengalami kepanikan saat mencari jalur keluar akibat tidak adanya penanda jalur evakuasi. Kepanikan korban akan membuat terjadinya keterlambatan evakuasi (delay) dalam proses evakuasi. Beberapa model telah dikembangkan menjadi satu konsep yang dapat digunakan dalam mengoptimalkan evakuasi, termasuk mengenai pemilihan rute perjalanan, serta kesiapan infrastruktur jalan untuk memberikan pelayanan pada pelaku evakuasi agar dapat selamat sampai ke tempat yang aman.

Saat proses evakuasi bencana berlangsung, penggunaan model evakuasi yang tepat mampu mengurangi resiko korban jiwa. Evakuasi adalah proses dimana penempatan orang dari tempat-tempat berbahaya ketempat yang lebih aman untuk mengurangi gangguan kesehatan dan kehidupan masyarakat yang rentan terkena dampak (Saadatseresht, Mansourian, &

Taleai, 2009). Proses evakuasi dibagi menjadi 2 kategori yaitu model makroskopis dan model mikroskopis. Model makroskopis fokus kepada manusia dan bangunan sebagai suatu kesatuan, sedangkan mikroskopis mempelajari perilaku pribadi dan interaksi antar individu dalam keramaian (Wu et al., 2018).

Pada saat ini telah banyak pengembangan model matematika tentang evakuasi. Pengembangan model evakuasi bertujuan mendapatkan hasil pergerakan yang optimal guna meminimalkan korban jiwa. Salah satu pengembangan model evakuasi adalah pemilihan rute. Pemilihan rute evakuasi yang tepat dapat membantu korban dalam meminimumkan waktu untuk menyelamatkan diri (Levy & Ben-elia, 2016). Proses rute evakuasi korban gempa dapat dilakukan dengan menggunakan video tangkapan kamera (Hoogendoorn & Daame, 2005) dan pelacakan ponsel (Hoogendoorn & Daame, 2005). Kedua proses evakuasi diatas masih menggunakan proses manual dalam mengamati lintasan yang digunakan untuk jalur evakuasi (Sun & de Vries, 2009).

Proses evakuasi yang di rancang pada artikel ini adalah menggunakan kategori makroskopis dan mikroskopis yaitu route choice models (Løvås, 1994) dan pendekatan multi tujuan (Coutinho-Rodrigues, Tralhão, & Alçada-Almeida, 2012). Model evakuasi route choice models

ini merupakan model evakuasi terperinci yang menjelaskan proses berpikir manusia dalam melakukan penyelamatan terhadap dirinya. Setiap individu maupun kelompok memiliki persepsi tentang arah, rintangan dalam menghadapi bencana (Pereira, Burgarelli, Duczmal, & Cruz, 2017) dan biasanya korban bencana selalu mencari rute teraman dan rute yang paling pendek untuk menyelamatkan diri dalam situasi yang darurat (Han, Liu, & Moore, 2017).

Berdasarkan latar belakang diatas, maka penelitian ini membahas dua hal yaitu: 1) jalur model evakuasi waktu tercepat pada gedung bertingkat yang memiliki dua pintu keluar; 2) proses simulasi evakuasi menggunakan bangunan bertingkat yang memiliki dua ruang ruangan dan dua pintu keluar. Keterbaruan penelitian ini adalah untuk menentukan jalur evakuasi tercepat yang dibutuhkan oleh korban gempa apabila memiliki dua jalur evakuasi pada gedung bertingkat.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari model matematika

evakuasi jalur korban gempa bumi yang hanya memiliki satu jalur evakuasi (Edwards, Dilwyn & Hamson, 2001). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memilih model evakuasi jalur tercepat pada kondisi gedung bertingkat yang memiliki dua ruangan dengan dua jalur evakuasi.

METODE PENELITIAN

Banyak model yang telah dikembangkan untuk mengevakuasi korban di dalam gedung (Cai & Chow, 2019; Kang, Jeong, & Kwun, 2015; Ma, Li, Zhang, & Chen, 2017). Hal ini disebabkan karena setiap gedung memiliki konstruksi yang berbeda-beda. Proses waktu evakuasi terdiri dari waktu sebelum evakuasi dan waktu selama evakuasi (Wu et al., 2018). Penelitian ini menggunakan dua jalur evakuasi, sehingga korban dapat mengambil beberapa keputusan untuk menyelamatkan diri. Model jalur evakuasi tercepat pada Gedung bertingkat dengan menggunakan dua jalur keluar dapat dilihat pada Gambar 1.

Keterangan:

Ex 1: jalur keluar pertama

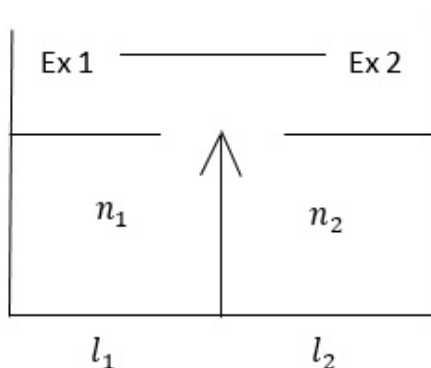
Ex 2: Jalur keluar kedua

n_1 : banyak siswa pada ruangan pertama

n_2 : banyak siswa pada ruangan kedua

l_1 : ruangan pertama

l_2 : ruangan kedua



Gambar 1. Keadaan ruangan evakuasi dengan dua pintu evakuasi

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Pemodelan Evakuasi

No	Variabel	Keterangan
1	x	Jumlah korban yang berpencar dari ruangan awal
2	d	Jarak antara korban evakuasi yang berjalan melalui pintu keluar
3	t_0	Waktu awal yang dimiliki korban dari ruangan untuk menuju pintu keluar
4	L_n	Panjang lintasan ke-n

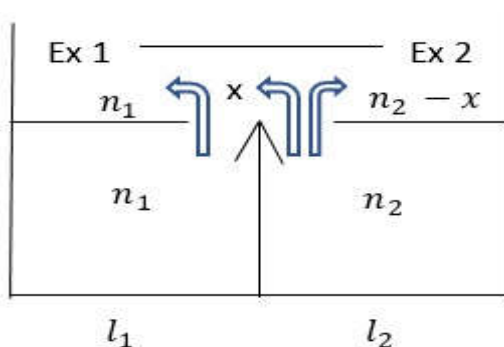
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan kondisi ruangan dan pintu keluar, maka dapat diperoleh beberapa kemungkinan jalur keluar sebagai upaya penyelamatan korban gempa bumi pada gedung bertingkat. Kemungkinan penyelamatan korban gempa bumi akan dijelaskan sebagai berikut:

A. Pemodelan Matematika

1. Kemungkinan I

Perhatikan Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Skema I evakuasi korban gempa

Gambar 2 merupakan gambaran keputusan yang diambil korban saat proses evakuasi terjadi. Korban yang berasal dari

ruangan pertama mengambil keputusan untuk berpencar dalam usaha menyelamatkan diri. Situasi ini mengakibatkan korban yang berasal ruangan pertama yang melewati jalur keluar pertama menjadi sedikit. Melalui kejadian di atas maka dapat ditentukan waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari masing-masing pintu evakuasi.

a). Waktu untuk keluar melalui jalur keluar pertama.

(1) Jika terjadi *delay*.

Delay akan terjadi jika waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi korban dari ruangan pertama berlangsung dalam waktu yang lama, sedangkan korban dari ruangan kedua sudah menunggu di pintu ruangan kedua untuk keluar.

Waktu yang dibutuhkan untuk orang terakhir dari ruangan pertama untuk keluar adalah :

$$t = t_0 + \frac{n_1 d}{v} \dots (1)$$

Sedangkan waktu yang dibutuhkan oleh korban pertama dari ruangan kedua adalah

$$t = t_0 + \frac{L_2}{v} \dots (2)$$

Apabila evakuasi korban dari ruangan pertama terlalu lama, maka akan terjadi delay evakuasi sehingga waktu evakuasi ruangan pertama lebih lama dari ruangan kedua, atau

$$t_0 + \frac{n_1 d}{v} > t_0 + \frac{L_2}{v} \dots (3)$$

$$n_1 > \frac{L_2}{d} \dots (4)$$

(Edwards & Hamson, 2001)

Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi korban melalui jalur keluar pertama adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_1 + x) d}{v} + \frac{L_1}{v} \dots (5)$$

(Edwards & Hamson, 2001)

(2) Jika tidak terjadi *delay*.

Hal ini terjadi ketika korban yang berasal dari ruangan kedua tidak menunggu orang terakhir dari ruangan pertama untuk keluar dari jalur keluar pertama.

(a) Waktu yang dibutuhkan melalui jalur keluar pertama.

Keadaan ini terjadi ketika orang pertama dari ruangan kedua tidak menunggu untuk keluar dari jalur pertama. Orang pertama dari ruang kedua tidak menunggu diakibatkan karena orang terakhir dari

ruangan pertama telah keluar. Waktu yang dibutuhkan untuk proses evakuasi dari jalur keluar pertama adalah:

$$t = t_0 + \frac{x d}{v} + \frac{L_1}{v} \dots (6)$$

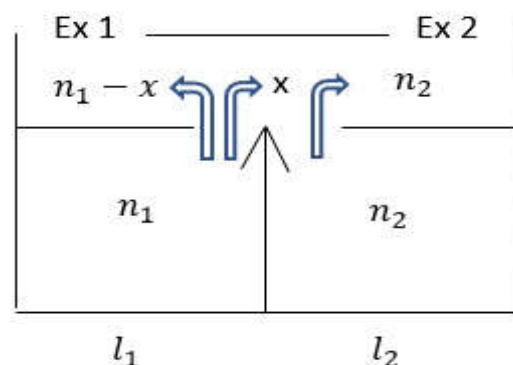
(b) Waktu untuk keluar dari jalur keluar kedua.

Pada kejadian ini, korban yang akan dievakuasi dari ruangan kedua menjadi berkurang. Hal ini disebabkan karena sebagian korban dari ruangan kedua sudah keluar melalui jalur keluar pertama. Korban yang keluar melalui jalur keluar kedua adalah $n_2 - x$. Maka waktu yang dibutuhkan oleh korban dari ruangan kedua untuk keluar adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_2 - x) d}{v} + \frac{L_2}{v} \dots (7)$$

2. Kemungkinan II

Perhatikan Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Skema II evakuasi korban gempa

Gambar 3 merupakan gambaran keputusan yang diambil korban gempa bumi saat proses evakuasi terjadi. Korban yang berasal dari ruangan pertama keluar secara terpisah. Ada korban yang keluar melalui jalur keluar pertama dan ada korban yang keluar dari jalur keluar kedua. Melalui kejadian yang diuraikan di atas maka dapat ditentukan waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari masing-masing jalur keluar terdekat.

a) Waktu untuk keluar melalui jalur keluar pertama.

Jumlah korban yang berasal dari ruangan pertama keluar dari melalui jalur keluar kedua sebanyak x , maka sisa korban yang keluar melalui pintu keluar pertama adalah $n_1 - x$. Maka waktu yang dibutuhkan oleh korban dari ruangan pertama untuk keluar dari jalur keluar pertama adalah:

(1) Jika terjadi *delay*.

Delay akan terjadi saat waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi korban yang berasal dari ruangan kedua berlangsung dalam waktu yang lama, sedangkan korban yang berasal dari ruangan pertama sudah menunggu untuk keluar menuju jalur keluar kedua. Waktu yang dibutuhkan untuk orang terakhir dari ruangan kedua untuk keluar adalah :

$$t = \frac{n_2 d}{v} + t_0 \dots (8)$$

Sedangkan waktu yang dibutuhkan oleh korban pertama dari ruangan pertama adalah :

$$\frac{L_1}{v} + t_0 \dots (9)$$

Akibat dari delay tersebut adalah:

$$\frac{n_2 d}{v} + t_0 > \frac{L_1}{v} + t_0 \dots (10)$$

Sehingga:

$$n_2 > \frac{L_1}{d} \dots (11)$$

Oleh sebab itu maka waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi korban melalui jalur keluar kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{n_2 d}{v} + \frac{L_2}{v} + \frac{xd}{v}$$

$$t = t_0 + \frac{(n_2 + x)d}{v} + \frac{L_2}{v} \dots (12)$$

Sedangkan waktu evakuasi korban pada jalur pertama adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_1 - x)}{v} + \frac{L_1}{v} \dots (13)$$

(2) Jika tidak terjadi *delay*

Ketika tidak terjadi keadaan delay, maka waktu yang dibutuhkan korban untuk keluar melalui jalur keluar pertama adalah:

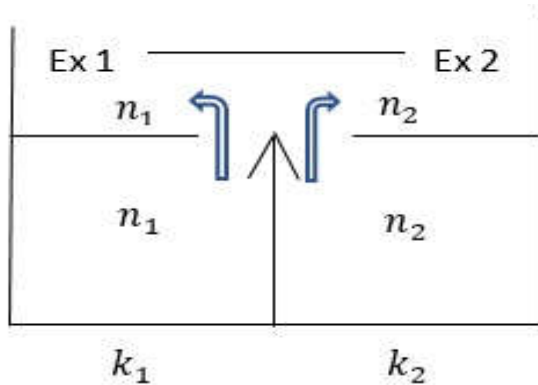
$$t = t_0 + \frac{x d}{v} + \frac{L_1}{v} \dots (14)$$

Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi korban melalui jalur kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_2 - x)d}{v} + \frac{L_2}{v} \dots (15)$$

3. Kemungkinan III

Perhatikan Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Skema III evakuasi korban gempa

Gambar 4 merupakan kemungkinan ke III dari proses evakuasi korban bencana gempa bumi yaitu kejadian apabila setiap ruangan keluar melalui jalur terdekat ruangan mereka masing- masing. Artinya korban dari ruangan pertama keluar dari jalur keluar pertama dan korban dari ruangan kedua keluar dari jalur keluar kedua

a) Waktu yang dibutuhkan korban ruangan pertama untuk keluar dari jalur keluar pertama.

Pada kejadian ini, korban pertama dari ruangan pertama tidak mengalami delay. Waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari jalur keluar pertama adalah:

$$t = t_0 + \frac{L_1}{v} + \frac{n_1 d}{v} \dots (16)$$

b) Waktu yang dibutuhkan korban ruangan kedua untuk keluar dari jalur keluar kedua.

Pada kejadian ini, orang pertama dari ruangan kedua tidak mengalami delay, maka

waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari jalur keluar kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{L_2}{v} + \frac{n_2 d}{v} \dots (17)$$

B. Simulasi

Pada saat terjadi bencana gempa bumi di kota Manasada, terdapat korban yang terjebak di sebuah sekolah bertingkat 2. Korban terjebak di dalam dua ruangan yang masing- masing berisi 40 orang siswa beserta dua orang gurunya. Kemudian guru menghubungi badan evakuasi setempat untuk menyelamatkan mereka. Setelah mereka melakukan komunikasi maka petugas evakuasi memberi alternative penyelamatan seperti berikut:

- Tiap- tiap orang keluar melalui jalur evakuasi yang paling dekat dengan ruangnya.
- Sepuluh siswa dari ruangan pertama dianjurkan keluar melalui jalur evakuasi yang dekat dengan ruangan kedua, sedangkan sisanya keluar dari jalur evakuasi yang dekat dengan ruangan pertama.
- Dua puluh siswa dari ruangan kedua keluar melalui jalur evakuasi yang dekat dengan ruangan pertama sedangkan sisanya keluar dari jalur evakuasi kedua (yang dekat dengan ruangan kedua).

Melalui alternatif yang diberikan oleh petugas evakuasi, manakah alternative evakuasi yang paling cepat untuk mengeluarkan korban jika panjang lintasan

terdekat dari pintu ruangan ke pintu keluar adalah 20 m, jarak antar korban adalah 0,5 meter, waktu awal adalah 4 sekon dan berjalan dengan kecepatan 3 m/s.

Penyelesaian:

a. Pada alternatif a tidak terdapat *delay*, karena tiap ruangan mengambil jalur masing-masing (jalur evakuasi terdekat) dan waktu yang dibutuhkan untuk keluar adalah sama karena kondisi ruangan memiliki karakteristik yang sama. Waktu yang dibutuhkan korban untuk keluar dari gedung adalah:

$$t = t_0 + \frac{L_1}{v} + \frac{n d}{v}$$

$$t = 3 + \frac{20}{3} + \frac{40(0,5)}{3}$$

$$t = 16,333 \text{ sekon}$$

Jadi waktu yang dibutuhkan oleh korban evakuasi untuk keluar dari gedung adalah 16,333 sekon.

b. Pada alternatif b, kita akan menghitung apakah terjadi *delay* pada pintu kedua atau tidak. Syarat terjadi *delay* pada ruangan kedua adalah:

$$n_2 > \frac{L_1}{v}$$

sehingga diperoleh:

$$40 > \frac{20}{3}$$

Maka dapat disimpulkan *delay* terjadi. Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari ruangan keluar kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_2 + x) d}{v} + \frac{L_1}{v}$$

$$t = 3 + \frac{(40 + 10)(0,5)}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 26,3333 \text{ sekon}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari pintu kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_2 - x) d}{v} + \frac{L_2}{v}$$

$$t = 3 + \frac{(40 - 10)(0,5)}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 3 + \frac{(30)(0,5)}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 14,667 \text{ sekon}$$

Jadi waktu evakuasi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan korban yang berasal dari ruangan pertama dari gedung adalah 26,33 sekon.

Pada alternatif c, kita akan menghitung terlebih dahulu apakah terjadi *delay* atau tidak. Syarat terjadi *delay* pada ruangan pertama adalah:

$$n_1 > \frac{L_2}{v}$$

sehingga diperoleh:

$$40 > \frac{20}{3}$$

Maka akan terjadi *delay* pada kejadian ini. Akibatnya waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari jalur keluar pertama adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_1 + x) d}{v} + \frac{L_1}{v}$$

$$t = 3 + \frac{(40 + 20)(0,5)}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 3 + 10 + \frac{20}{3}$$

$$t = 19,667 \text{ sekon}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk keluar dari ruangan kedua adalah:

$$t = t_0 + \frac{(n_2 - x) d}{v} + \frac{L_2}{v}$$

$$t = 3 + \frac{(40 - 20)(0,5)}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 3 + \frac{10}{3} + \frac{20}{3}$$

$$t = 13 \text{ sekon}$$

Jadi waktu evakuasi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan korban dari pintu kedua adalah 13 sekon. Namun karena evakuasi merupakan waktu tercepat untuk menyelamatkan korban, maka waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi adalah 19, 67 sekon.

Berdasarkan hasil simulasi, dapat diperoleh informasi bahwa waktu tercepat dalam proses evakuasi pada gedung bertingkat adalah 16,333 sekon. Waktu evakuasi tercepat ini diperoleh apabila korban keluar melalui jalur evakuasi terdekat dengan ruangan masing-masing korban. Model evakuasi melalui jalur terdekat sangat efektif karena pada model ini tidak terdapat delay pada saat proses evakuasi korban.

Model evakuasi melalui pintu terdekat juga dapat berlangsung dengan baik apabila korban tidak panik dalam menghadapi bencana gempa bumi.

Ketidakpanikan korban gempa bumi mampu membuat korban bencana keluar dengan teratur dari dalam ruangan dan tidak tergesa-gesa supaya waktu untuk melakukan evakuasi semakin cepat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi kejadian pemodelan mitigasi bencana gempa bumi pada gedung bertingkat dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: (1) keadaan delay dalam suatu ruangan terjadi apabila korban dari suatu ruangan belum selesai keluar dari ruang tersebut tetapi korban dari ruangan kedua telah menunggu di depan ruangan pertama; (2) evakuasi akan semakin cepat selesai apabila tidak terjadi delay dari tiap- tiap ruangan; (3) waktu evakuasi akan semakin cepat selesai apabila korban keluar dari jalur keluar yang terdekat dengan ruangnya; dan (4) semakin dekat jarak antara korban dalam evakuasi maka semakin cepat waktu evakuasi berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, M. R., Yulianti, G., Yunus, R., Wiguna, S., Adi, A. W., Ichawana, A. N., ... Septian, R. T. (2016). *Risiko bencana indonesia* (R. Jati & M. R. Amri, eds.). Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Cai, N., & Chow, W. K. (2019). Numerical studies on fire hazards of elevator evacuation in supertall buildings.

- Radiusman, A. Fauzi, M. A. Mauldya, A. Widodo, M. Simanjuntak/ *Edumatsains* 5 (1) (2020) 39-50
- Indoor and Built Environment*, 28(2), 247–263.
<https://doi.org/10.1177/1420326X17751593>
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L., & Alçada-Almeida, L. (2012). Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: The design of urban evacuation plans. *Journal of Transport Geography*, 22, 206–218.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.006>
- Edwards, Dilwyn & Hamson, M. (2001). *Guide to mathematical Modelling palgrave mathematical Guides* (2nd editio). New York, N.Y.: Palgrave Macmillan.
- Edwards, D., & Hamson, M. (2001). *Guide to mathematical Modelling palgrave mathematical Guides* (2nd second). New York, N.Y.: Palgrave Macmillan.
- Han, Y., Liu, H., & Moore, P. (2017). Simulation Modelling Practice and Theory Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 75, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.010>
- Hoogendoorn, S. ., & Daame, W. (2005). Pedestrian behavior at bottleneck. *Transportation Science*, 29(3), 147–159.
- Kang, J., Jeong, I. J., & Kwun, J. B. (2015). Optimal facility-final exit assignment algorithm for building complex evacuation. *Computers and Industrial Engineering*, 85, 169–176.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.012>
- Kovács, G., & Spens, K. (2009). Identifying challenges in humanitarian logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 39(6), 506–528.
<https://doi.org/10.1108/09600030910985848>
- Levy, N., & Ben-elia, E. (2016). Emergence of system optimum: A fair and altruistic agent-based route-choice model. *Procedia - Procedia Computer Science*, 83, 928–933.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.187>
- Løvås, G. G. (1994). Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B*, 28(6), 429–443. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90013-2)
- Ma, Y., Li, L., Zhang, H., & Chen, T. (2017). Experimental study on small group behavior and crowd dynamics in a tall office building evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 473, 488–500.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.032>

- Radiusman, A. Fauzi, M. A. Mauldya, A. Widodo, M. Simanjuntak/ *Edumatsains* 5 (1) (2020) 39-50
- Pereira, L. A., Burgarelli, D., Duczmal, L. H., & Cruz, F. R. B. (2017). Emergency evacuation models based on cellular automata with route changes and group fields. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 473, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.048>
- Pribadi, K. S., Argo, T., Mariani, A., & Parlan, H. (2011). Implementation of Community Based Disaster Risk Management in Indonesia: Progress, Issues and Challenges. In R. Osti (Ed.), *Forms of community participation in disaster risk management practices* (pp. 1–15). New Jersey: Nova Science Publishers, Inc.
- Saadatseresht, M., Mansourian, A., & Taleai, M. (2009). Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.032>
- Sun, C., & de Vries, B. (2009). Automated human choice extraction for evacuation route prediction. *Automation in Construction*, 18(6), 751–761. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.02.009>
- Wu, Y., Kang, J., & Wang, C. (2018). A crowd route choice evacuation model in large indoor building spaces. *Frontiers of Architectural Research*, 7(2), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2018.03.003>

